

主機回転数を監視することによって実現する 荒天遭遇時の省エネかつより安全な運航について

宋 玉中*, 見良津 黎*, 高木 道雄*, 若生 拓也*, 高品 純志**

1. はじめに

2023年に国際海事機関（IMO）は、2050年頃までに国際海運における温室効果ガス（GHG）排出量をネットゼロとする目標を設定した。この目標達成に向けて、海運業界では代替燃料の採用や更なるエネルギー効率の向上といった対策が検討されている。特に、エネルギー効率の向上は、カーボンフリー又はカーボンニュートラル燃料の導入後においても、コスト削減の観点から重要である。これは、代替燃料の価格が現行の重油（HFO）と比較して大幅に高騰すると予測されているためである。エネルギー効率の向上は、省エネ装置の導入や運航最適化によって達成可能であり、特に運航最適化は通常ハードウェアの変更を伴わないため、比較的容易に実施できるのが利点である。

本稿では、荒天遭遇時における主機の運転最適化による燃料節約に焦点を当てる。第2章では、様々な海象条件下での主機及び船舶の挙動について概説する。第3章では、最大到達可能主機回転数（Maximum Attainable Main Engine Speed, MAMES）の概念を説明する。第4章では、荒天遭遇時に主機の作動限界により発生する燃料損失量の試算結果を示す。第5章では、荒天遭遇時に燃料を節約するための主機運転方法を示し、第6章では結論をまとめる。

2. 各海象条件下における主機と船舶の挙動

船舶が荒天に遭遇すると、船体抵抗が増加するため、一定の船速を維持するには主機の出力を増加させる必要がある。図1は、仮想的なパナマックス型ばら積み貨物船（主機の出力：10,000kW、回転数：80rpm）における主機出力、船速、及び主機回転数の関係を概念的に示したものである。図1の左側は、波高の異なる海象条件下における船速と必要主機出力の関係を、異なる色の曲線で示している。図1の右側は、異なる海象条件下における主機回転数と主機出力の関係を示しており、これらの曲線は各海象条件に対応するプロペラ特性曲線に基づいて計算された。通常、船舶は一定の主機（プロペラ）回転数で航行する。したがって、海象が穏やかな状態から荒れた状態へ変化すると、操船者が意図的に操作しない限り主機は指示された回転数に対して、船速 - 出力の運転点が図1左側の破線で示すように移動する。

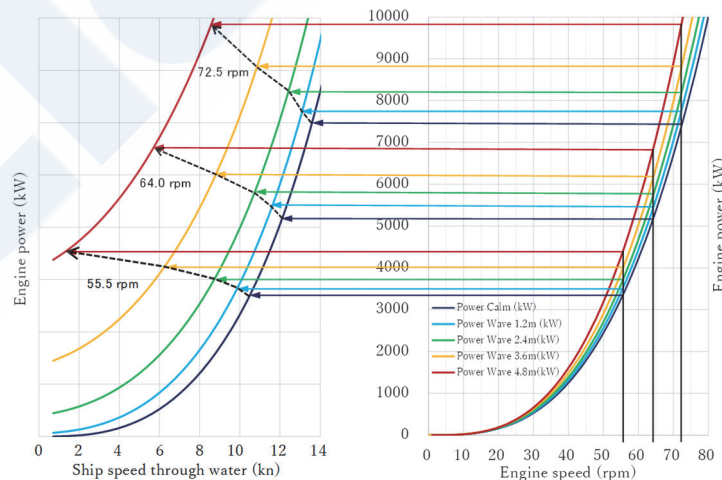


図1 仮想のパナマックス型ばら積み貨物船における主機出力、船速、主機回転数の関係

* 開発本部 技術研究所

** 総務本部 人材開発センター

この一般的な挙動は、実船計測データとも概ね一致する。図2は、P. Gupta¹⁾が発表した、全長200mの一般貨物船における3年間の実船計測データを示したものである。各プロットは、15分間の平均値である。なお、船体の加速・減速時のデータを除外する前処理を行い、準定常状態にあるとみなせるように処理されている。

図2の各プロットは広範囲に散在しているように見えるが、一部のプロットは特定の傾斜を持つ直線に近い複数の線上に集中していることが分かる。これらの線は、図1の説明で述べたように、特定の主機回転数が頻繁に選択されていることを示している。

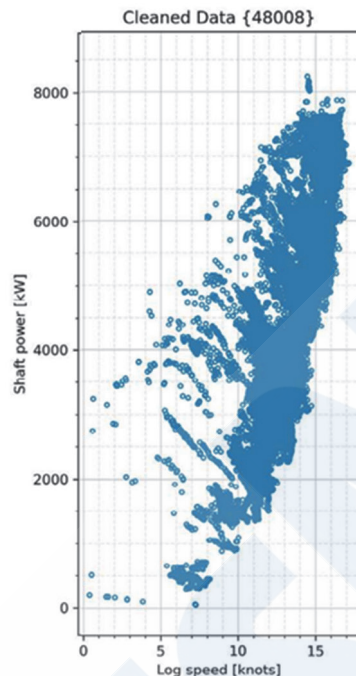


図2 一般貨物船の計測データ¹⁾

3. 最大到達可能主機回転数 (MAMES)

一般的な検討手法では、指示された回転数を維持するために主機は必要なトルクを自在に供給できる前提で取り扱われることが多い。実際には主機の出力には回転数ごとに限界があり、これは主機の過負荷を避けるため、特定の回転数において発生可能なトルクに制限が設けられているためである。この制限は1サイクルあたりにシリンダーへ噴射される燃料の量を制限することで実現される。1サイクルあたりの燃料噴射量は燃料発熱量、燃焼効率、機械的リンク機構等を介してトルクを決定する支配的ファクターであり、簡易的には発生するトルクと比例関係として取り扱える。このため燃料噴射量制限は本質的には回転数ごとのトルク限界に相当する。

従来、燃料噴射ポンプにおいて、燃料ラックにより1サイクルあたりの燃料噴射量が制御されていたことから、この限界は一般的に燃料ラックリミッターと呼ばれる。図3の右側の図に示す赤の破線の曲線が、この燃料ラックリミッターを表している。

プロペラの負荷曲線が燃料ラックリミッターと交点を持つ場合、主機の駆動トルクがプロペラ負荷トルクを上回れないため、理論上、その交点を超える回転数までプロペラ（主機）を加速することは不可能となる。言い換えれば、この交点がMAMESを決定する。

プロペラ負荷の観点では、最も厳しい条件はボラードプル (bollard pull) であり、船体が静止した状態でプロペラにかかる負荷状態を指す。図3右側の黒の破線がこの状態を示している。ボラードプル時の必要出力を正確に算出することは困難であるが、一般的に軽負荷プロペラ曲線と比較して15～20%のheavy running factorが適用されているため、図3では、20%のheavy running factorを使用している²⁾。ボラードプル状態では、MAMESは通常のプロペラ負荷時（たとえ荒天時であっても）と比較して著しく低くなることから、図3右側から確認できる。

さらに、特定の回転数においてトルク限界により最大利用可能出力が制約されるため、船速も利用可能出力に応じて制限される。例えば、図3左側では、主機回転数64.0rpm及び72.5rpmにおいて、それぞれ遭遇有義波

高（significant wave height）が3.6m及び2.4mにおいて機関出力が限界に達するためそれを超える波高条件下においては船速が著しく低下することが示されている。この現象は、図2のプロットの連なる線が左に向ってある範囲では上がるが、左縁辺りでは左斜め下方向に変化している様子からも確認できる。

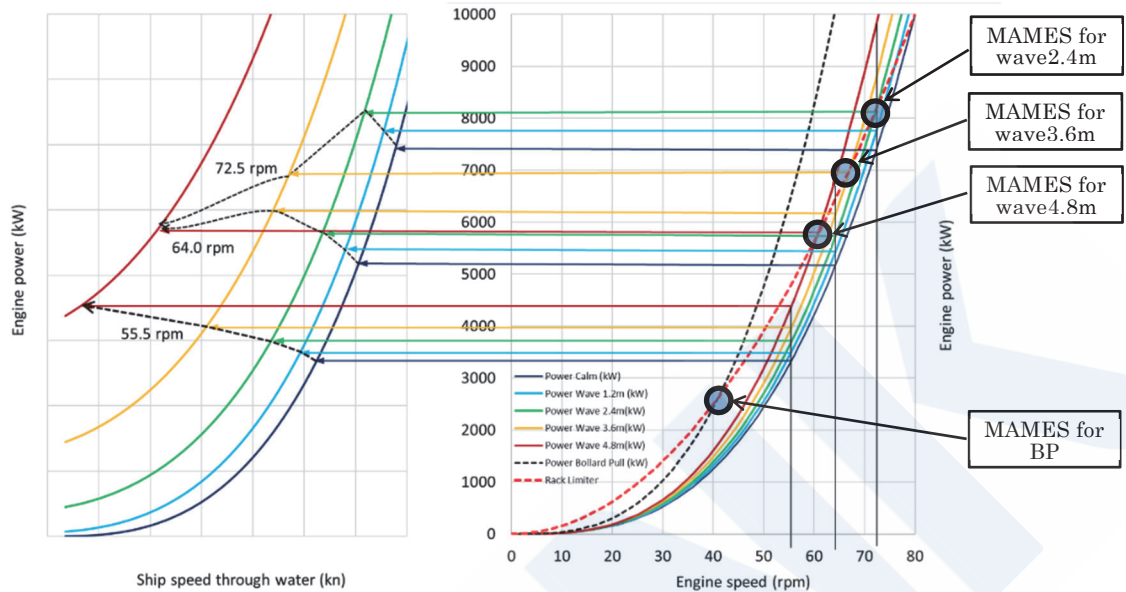


図3 燃料ラックリミッターによるMAMESの概念

パナマックス型ばら積み貨物船の実船計測データでも同様の傾向が確認されており、その結果を図4に示す³⁾。各プロットは1時間の平均値を示す。出力は最大連続出力（MCR）を基準に、対水船速はサービススピードの値を基準にそれぞれ正規化している。各プロットの色は本船の遭遇した波高を表す。同様の正規化は、図6、図7及び図8においても適用している。

図4より、主機出力が0.2～0.3の低負荷領域の範囲では、プロットは左上に傾くほぼ直線上に集中している。これは、本船がMAMES以下の特定の指示回転数でよく運航されていたことを示している。一方、主機出力が0.4～0.6の比較的高負荷領域の範囲に達すると、サンプリング領域の左側にある一部のプロットでは、データ点の傾きが水平又は左下方向へ変化している。これは、主機のトルクリミットに達したことを示しており、4m程度の比較的高い波高に遭遇していることと対応している。

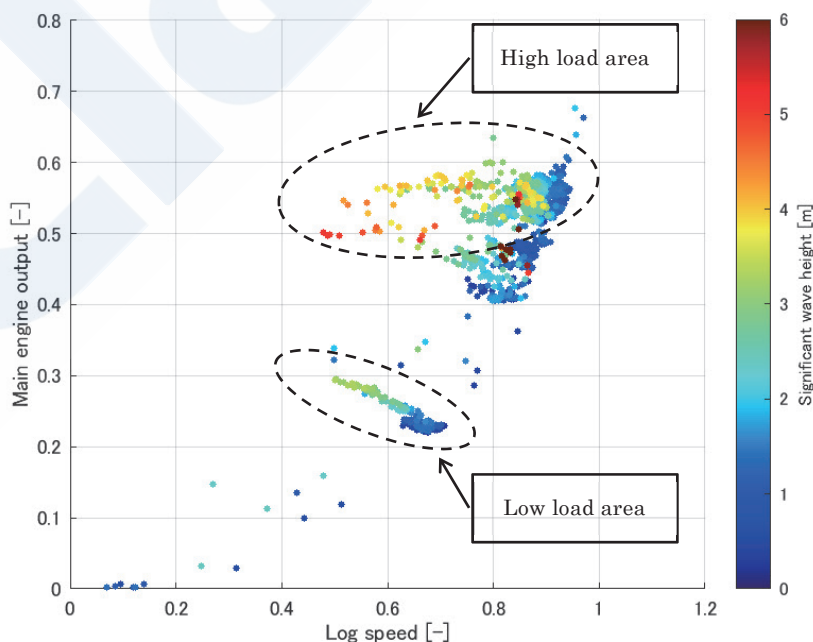


図4 パナマックス型ばら積み貨物船の主機出力と船速の関係を示す実測データ（色：有義波高）

4. 過大な指示回転数による燃料ロスの発生

一般的なディーゼル主機の調速メカニズムにおいては指示回転数に追従するようにガバナーが目標燃料ラック位置を増減する⁴⁾。主機回転数が指示回転数を下回る状況においては、ガバナーは1サイクルあたりの燃料供給量を増加するよう作動する。しかし、指示回転数がMAMESを超えている場合、燃料ラックリミッター（トルクリミッター）によって理論上、その回転数に達し得ない。この場合、図5に示すように、MAMESと指示回転数の差に対応する追加燃料は回転数増加につながらないため無駄となるものと考えられる。

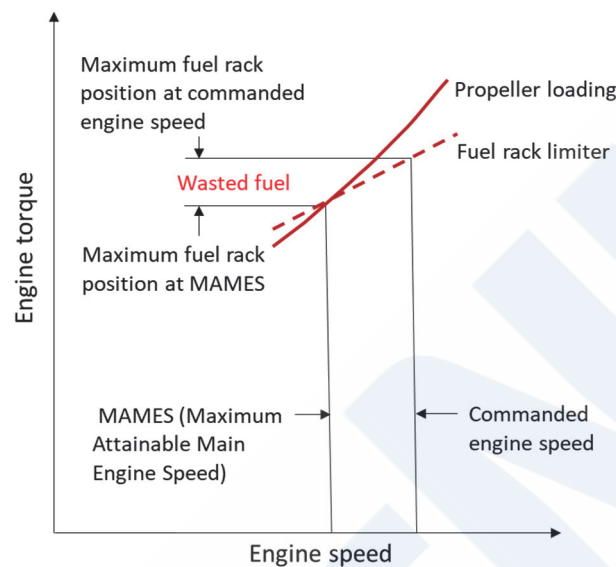


図5 MAMES及び指示回転数と燃料損失の関係

荒天に遭遇し、指示された主機回転数を達成できない状況が実船計測によって確認されている。図6は、パナマックス型ばら積み貨物船における約70日間の航海データを基に、主機回転数と指示回転数の関係をFuel indicator（燃料ラック）（左図）及び有義波高（右図）の対比で表したものである。このケースでは、主機回転数と指示回転数の差は最大で約3.0rpmとなり、特に指示回転数が0.79及び0.85付近で顕著であった。図6左側で注目すべき点は、主機回転数が指示回転数を下回ると、指示回転数の高さに関係なく1サイクルあたりの燃料噴射量（Fuel indicator）が増加することである。これは、本章冒頭で述べた通り、ガバナーが主機回転数と指示回転数の速度差を検知すると、機関を加速し速度差を埋めようとするために燃料供給量を増やすためである。しかし、速度差を埋めることができない場合、燃料ラックは高止まり状態が続くが、増速につながらないため燃料ロスが生じるものと考えられる。

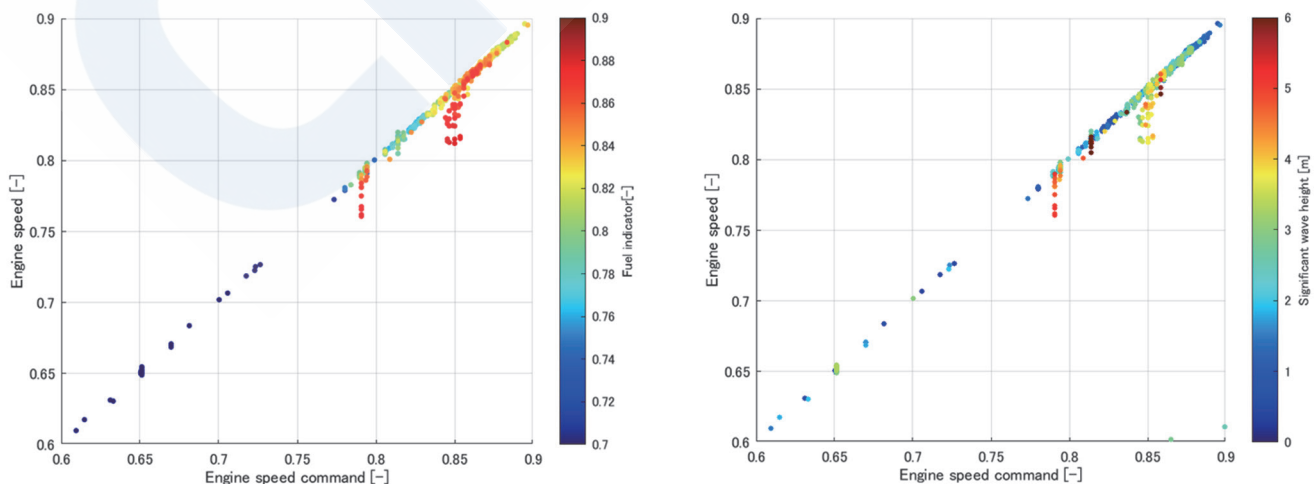


図6 パナマックス型ばら積み貨物船の主機回転数と指示回転数の関係
（左側の色：Fuel indicator，右側の色：有義波高）

図7は前述の実船計測データを用いて、Fuel indicator（燃料ラック）と指示回転数の関係を示し、更に機関の製造工場でのShop test時のデータと比較するものである。プロットの色は有義波高を表す。指示回転数比が0.79及び0.85付近で高い波高に対応して主機回転数と指示回転数の差が生じ、Fuel indicatorがShop test時の値を上回っていることが示されている。これは、主機が指示回転数に到達できないためガバナーが燃料供給をラックリミッターまで増やしたものと考えられる。

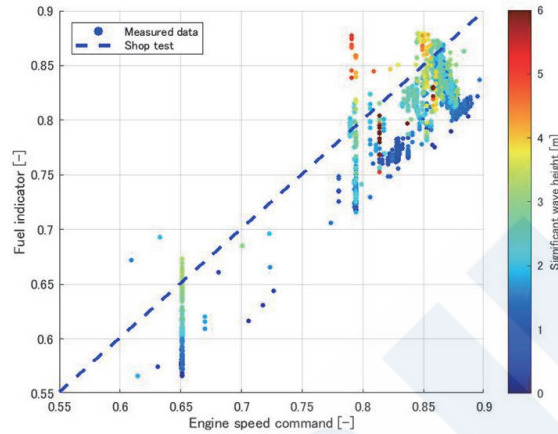


図7 パナマックス型ばら積み貨物船のFuel indicatorと指示回転数の関係

燃料ロス量は、MAMESと主機回転数及び指示回転数の差によって決まる。船舶の朽化に伴い、船体及びプロペラの汚れが増し、推進効率が低下し、先の図1で示した特性曲線は負荷増加方向へ変化するため、同じ海象条件においてもMAMESは低下する傾向がある。そのため、船舶の老朽化により、主機回転数及び指示回転数の差がより生じやすくなり、燃料ロス量は増加すると考えられる。

表1に、仮想の主機（10,000kW，80rpm）に対する異なるMAMES及び主機回転数と指示回転数の速度差による燃料ロス量の推定値を示す。左端の列「N/N_{MCR}」は、MAMESと最大連続運転出力（MCR）の回転数比を示している。表から分かるように、速度差が大きいほど燃料ロス量は増加する。一方、MAMESが上昇すると、燃料ロス量は増加するが、燃料消費量全体に占める割合は減少する。

黄色で示した行は、MAMES比率が0.79及び0.85であり、これらは前述のパナマックス型ばら積み貨物船で速度差が観測された回転数に対応している。このMAMES比率において、速度差が3rpm発生すると、燃料ロス量はそれぞれ9.8%及び9.0%に達し、1日あたりそれぞれ1,943kg及び2,260kgの燃料ロスがあると試算される。

表1 仮想の主機（10,000kW，80rpm）に関する燃料ロス量の試算

N/N _{MCR}	Load (%)	Speed gap (1 rpm)		Speed gap (2 rpm)		Speed gap (3 rpm)	
		Wasted fuel (kg/day)	Wasted fuel (%)	Wasted fuel (kg/day)	Wasted fuel (%)	Wasted fuel (kg/day)	Wasted fuel (%)
0.70	34	504	3.6	1,017	7.3	1,540	11.0
0.71	36	522	3.5	1,054	7.1	1,594	10.8
0.73	38	541	3.5	1,091	7.0	1,650	10.6
0.74	40	559	3.4	1,128	6.9	1,707	10.4
0.75	42	579	3.4	1,167	6.8	1,764	10.3
0.76	44	598	3.3	1,206	6.7	1,823	10.1
0.78	47	618	3.3	1,245	6.6	1,882	9.9
0.79	49	638	3.2	1,285	6.4	1,943	9.8
0.80	51	658	3.1	1,326	6.3	2,004	9.6
0.81	54	679	3.1	1,367	6.2	2,067	9.4
0.83	56	699	3.1	1,410	6.2	2,130	9.3
0.84	59	721	3.0	1,452	6.1	2,194	9.2
0.85	61	742	3.0	1,496	6.0	2,260	9.0
0.86	64	764	2.9	1,540	5.9	2,326	8.9
0.88	67	787	2.9	1,584	5.8	2,393	8.8
0.89	70	809	2.8	1,629	5.7	2,461	8.6
0.90	73	832	2.8	1,675	5.6	2,530	8.5

図8に、パナマックス型ばら積み貨物船の一航海の時刻歴データを示している。赤で囲まれた箇所は、主機回転数と指示回転数の速度差が発生した時間帯であり、有義波高4mを超える横波に遭遇した際に、指示回転数を意図的に下げたことが確認されている。しかし、指示回転数を下げた後も、主機回転数との差が約8時間継続し、最大約2.5rpmの速度差が確認された。この速度差による燃料ロスを、指示回転数と実際の回転数の差が最大(約2.5rpm)の場合と、差がない場合の2つのケースでのFuel indicatorの差を基に計算した。その結果、推定された燃料ロス量は2,286kg/日であり、これは総燃料消費量の12.2%に相当する。

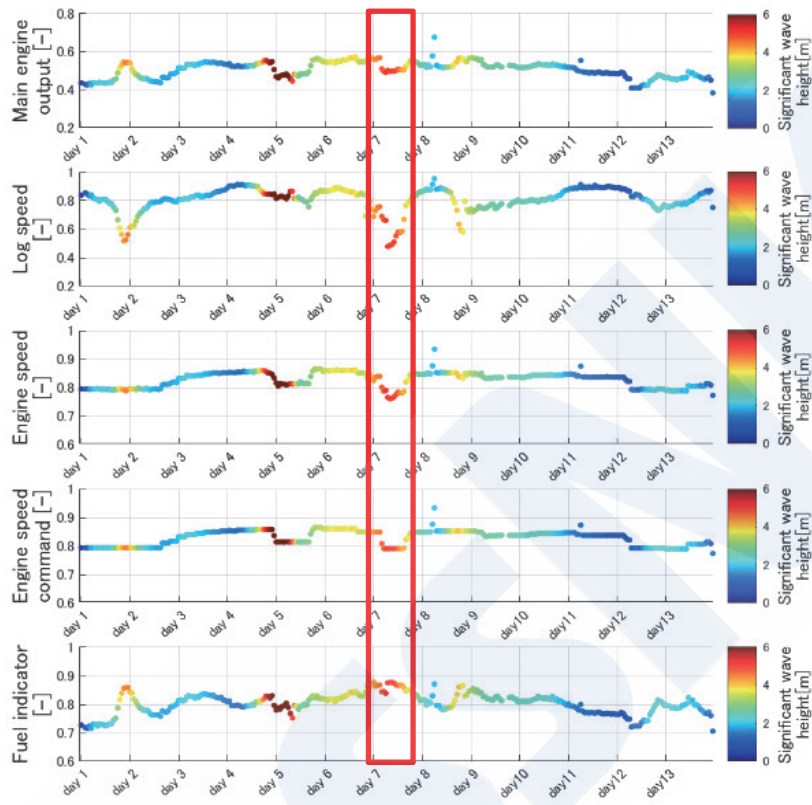


図8 パナマックス型ばら積み貨物船の関連項目の時系列データ

主機回転数と指示回転数との速度差による燃料ロス量は、船舶が荒天に遭遇する確率に依存していると考えられる。表2は、代表的な航路ごとに、1年間に遭遇波高が4.5mを超える時間とその比率を示し、それらの期間中に2.5rpmの速度差を継続した場合の燃料ロス量とコストを推定したものである。パナマックス型ばら積み貨物船の代表的な航路は、図9に示すAISデータを基に選定した。各航路の仮想的な遭遇海象データは波浪追算(ERA5)と荒天回避モデルを用いて算出した^{5) 6)}。船舶の運航率は80%、燃料価格(VLSFO)は600USD/MT、C重油の比重は0.96と仮定した。

表2によると、年間で4.5mを超える波に遭遇する確率は、アジア・オーストラリア航路で81時間、アジア・米国西岸航路で901時間、米国東岸・ヨーロッパ航路で1,196時間と推定された。また、波高4.5mを超える期間中に2.5rpmの速度差が継続した場合、1年間で発生する燃料ロスは8～114MT、対応するコストは5,000～71,000USDと推定された。なお、これらの試算は、パナマックス型ばら積み貨物船を対象とし、さまざまな仮定の下で算出したものである点に留意が必要である。

表2 各航路で1年間に遭遇波高が4.5mを超える時間、燃料ロス量及びコスト

Route	Time (h)	Time ratio (%)	Wasted Fuel (MT)	Wasted Fuel cost (USD)
Asia-Australia	81	0.9	8	5,000
Asia-US West Coast	901	10.3	86	54,000
US East Coast-Europe	1,196	13.7	114	71,000

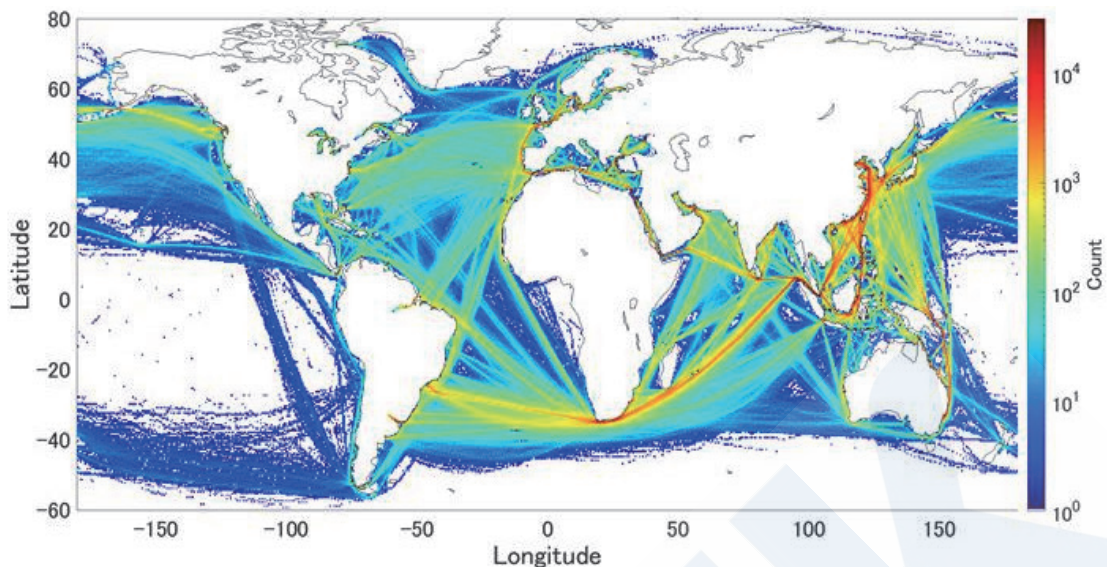


図9 AISデータに基づくパナマックス型ばら積み貨物船の航路

経済的な視点に加え、安全性の観点も重要である。速度差が存在する間は主機が速度差を埋めようとし続けるため、常に加速状態に置かれる。この状態では、過給機の回転体の慣性により、空燃比が定常状態よりも低下する傾向がある。空燃比が低下すると、完全燃焼が達成されず、一時的に高密度の黒煙を排出する可能性がある。排気ガス中の不完全燃焼粒子（すす）は過給機タービンブレードに付着し、不均衡を生じさせる（図10）。この不均衡により振動が生じローターやベアリングの急速な摩耗を引き起こす可能性がある⁷⁾⁸⁾。

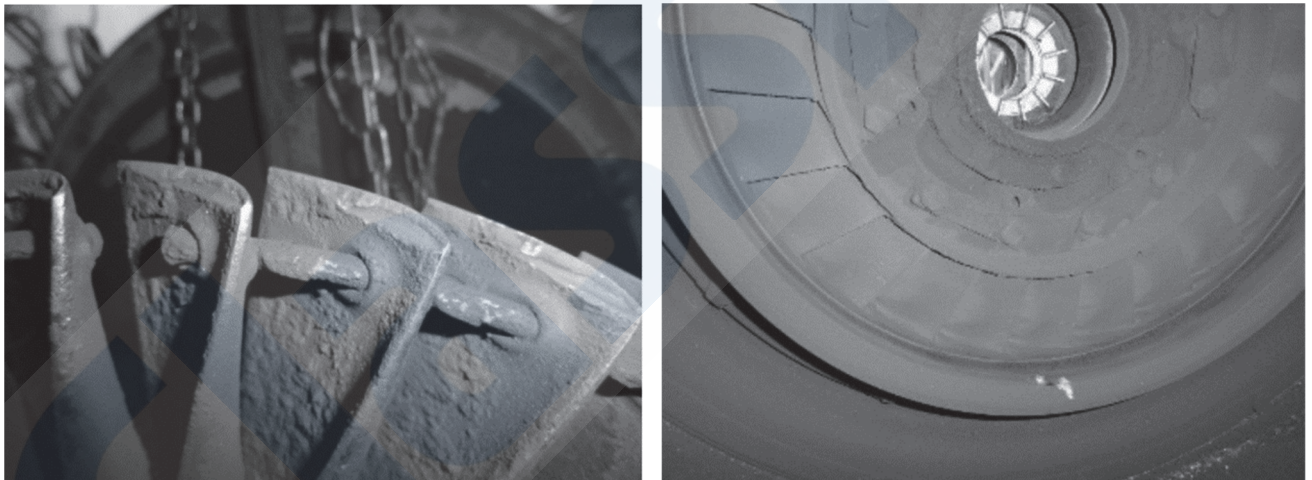


図10 過給機部品のすすによる汚れ。タービンブレード（左）とタービンノズル（右）

5. 荒天遭遇時における燃料ロスの改善方法

海運業界では、荒天遭遇時に指示回転数を下げることは一般的な慣行である。しかし、指示回転数をどの程度下げるべきかは、通常、船員の経験に任されている⁹⁾。前述の通り、荒天時に指示回転数を下げたにもかかわらず、実際の回転数は数時間にわたり指示回転数を下回っていたケースも確認されている。これらの事実は、船員が主機回転数と指示回転数の速度差が生じていることに気づいていなかったことが示唆される。

したがって、実際の主機回転数と指示回転数の差を監視し、速度差が継続する場合は、速度差が解消されるまで指示回転数を調整することが推奨される。船舶管理会社においては、これらの現象が船上で発生していないかを確認するため、過去の運航データの詳細な分析を実施することが強く推奨される。主機回転数の速度差が確認された場合、燃料ロスが発生している可能性があるため、指示回転数の調整により改善できる余地がある。

6. おわりに

船舶が荒天に遭遇すると、主機回転数と指示回転数の間に速度差が生じることがあり、この速度差は天候が回復するまで数時間続く可能性がある。この現象は、パナマックス型ばら積み貨物船の実船計測データによって確認され、その発生メカニズムを理論的に考察した。長時間続く速度差は燃料ロスを引き起こし、主機回転数や速度差の大きさによっては、通常の手速度差がない運転時の燃料消費量の約10%に達することがある。また、これらの速度差は、不完全燃焼を引き起こし、過給機のタービンブレードやノズルにすすが付着する原因となる。タービンへの付着物はローターの不均衡を招き、振動やローター及びベアリングの急速な摩耗を引き起こす。

荒天遭遇時に主機回転数を適切に設定し、速度差を解消することで、燃料を節約することが可能である。これにより、経済的な利益だけでなく、過給機や排気ガスにさらされるその他の部品の故障リスクも低減できる。また、船舶の老朽化や船体・プロペラの汚れは、主機回転数と指示回転数の間に速度差が生じやすくなる要因となるため、特に老朽化した船舶には十分な注意が必要である。

参考文献

- 1) P. Gupta et al., Ship performance monitoring using machine-learning, Ocean Engineering 254, 2022.
- 2) Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), Compliance with EEXI Regulation: Risks associated with Power Limitations, 2024. (<https://www.ocimf.org/doclink/compliance-with-eexi-regulation/eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9.eyJzdWIiOiJjb21wbGlhbmNILXdpdGgtZWV4aS1yZWd1bGF0aW9uIiwiaWF0IjoxNzIxNzUxNTM3LCJleHAiOiE3MjE4Mzc5Mzd9.QzIXk7Gkah5FfnF3u7NbquGVyiFovwPGLzc8HCJd6Ys>)
- 3) 見良津他：実船計測データ解析による実海域での船速低下に関する検討，第94回マリンエンジニアリング学術講演会，2024.
- 4) P. Mizythras et al., Numerical study of propulsion system performance during ship acceleration. (https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/71024557/Mizythras_etal_OE_2017_propulsion_system_performance_during_ship_acceleration.pdf)
- 5) H. Hersbach et al., The ERA5 global reanalysis, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020;146:1999–2049. (<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/qj.3803>)
- 6) W.Fujimoto et al., Analyzing AIS and wave hindcast data for global wave scatter diagrams with seasonality, Ocean Engineering 314, 2024.
- 7) 川合：過給機の損傷事例と原因，日本マリンエンジニアリング学会誌，第51巻，第2号，76-82，2016. (https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/51/2/51_208/_pdf/-char/ja)
- 8) 林：船用過給機のタービン部における浸食損傷の発生状況に関する調査報告，日本船用機関学会誌,第25巻，第7号，49-60，1990.
- 9) Anish Wankhede, What to do When Ship Encounters Rough Weather, Marine Insight. (<https://www.marineinsight.com/marine-safety/what-to-do-when-ship-encounters-rough-weather/> [Accessed 1st April 2025])